



СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
RUSSIAN POWER SYSTEM OPERATOR

ОДУ СИБИРИ

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Андерс Михаил Алексеевич

Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири,
Новосибирский государственный технический университет



Для передачи электрической энергии на большие расстояния предусматривается сооружение передач постоянного тока, в том числе для увеличения пропускной способности электрической сети между ОЭС Сибири и ОЭС Востока, выдачи мощности Нововоронежской АЭС-2 и Мокской ГЭС.

Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.12.2024 № 4153-р

	Протяженность объекта, км	Необходимый год реализации
Двухполюсная электропередача постоянного тока от преобразовательной ПС 500 кВ Нововоронежская до преобразовательной ПС кВ Москва	550	2032
Двухполюсная электропередача постоянного тока от преобразовательной ПС 500 кВ в районе ПС 1150 кВ Итатская (ПС 500 кВ Камала-1) в юго-восточную часть ОЭС Сибири	1420	2030
Электропередача постоянного тока от преобразовательной ПС 500 кВ в районе Мокской ГЭС до преобразовательной ПС 500 кВ в районе ПС 220 кВ Чита	600	2032
Двухполюсная электропередача постоянного тока от преобразовательной ПС 500 кВ в юго-восточной части ОЭС Сибири до преобразовательной ПС 500 кВ в районе ПС 220 кВ Чита	800	2032
Двухполюсная электропередача постоянного тока от преобразовательной ПС 500 кВ в районе ПС 220 кВ Чита до преобразовательной ПС 500 кВ в районе ПС 500 кВ Даурия	1000	2036



ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА

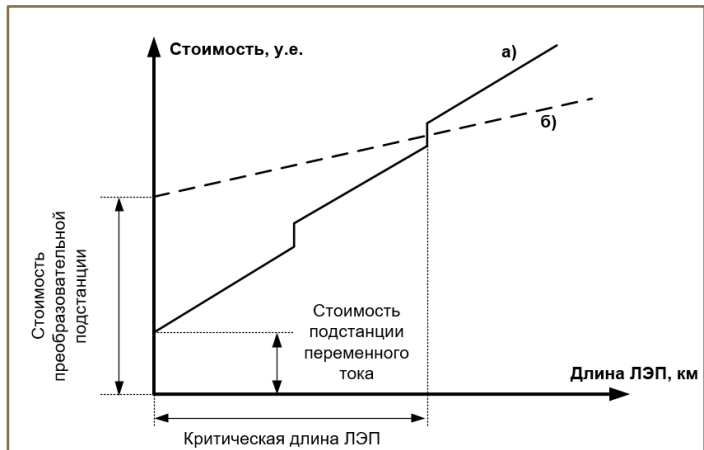


График зависимости стоимости ЛЭП переменного (а) и постоянного (б) тока от длины ЛЭП

✓ ЛЭП постоянного тока имеют **на 30 %** меньшие потери мощности по сравнению с ЛЭП переменного тока равной номинальной мощности



Быстрое и безынерционное изменение величины и направления перетока активной мощности



Отсутствие ограничений пропускной способности по условиям нарушения устойчивости



Обеспечение несинхронной связи между энергосистемами



Ограничение токов КЗ в системе



Большая надежность работы при форсировании оставшегося в работе полюса



Меньшая зона отчуждения земли для трассы ВЛ



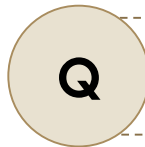
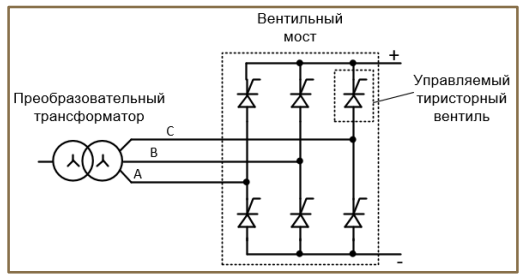
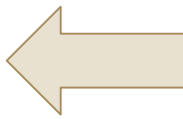
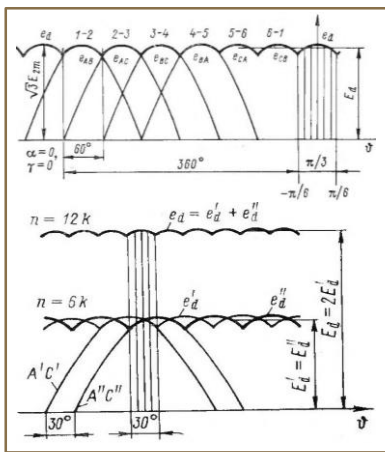
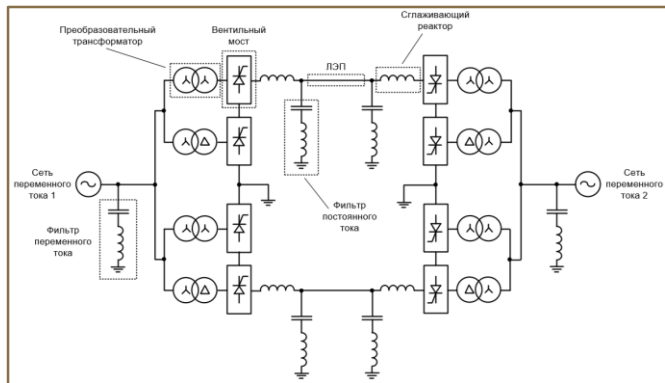
Дороговизна и надежность силовых полупроводниковых устройств для преобразовательных подстанций



Критическое значение длины ЛЭП, при котором вложения в ЛЭП переменного тока и ППТ становятся равными, составляет 400-700 км



ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ТОКА



Работа преобразователя характеризуется **потреблением** реактивной мощности

Структурная схема биполярной ЛЭП постоянного тока на преобразователях тока

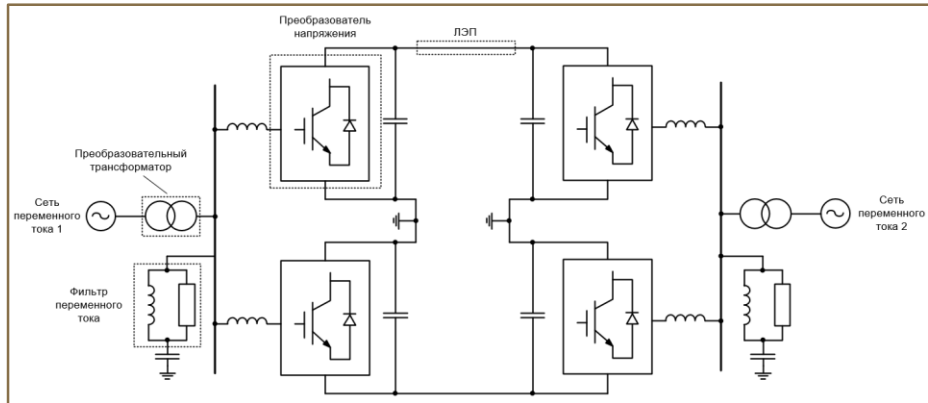
Название проекта, страна	Номинальное напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина ЛЭП, км
Changji – Guquan, Китай	± 1100	12 000	3284
North East – Agra, Индия	± 800	6 000	1725
BeloMonte 1, Бразилия	± 800	4 000	2092
Bipole III, Manitoba Hydro, Канада	± 500	2 000	1400

Задачи применения:

- ✓ Передача электроэнергии большой мощности на дальние расстояния
- ✓ Коммерческая передача электроэнергии
- ✓ Увеличение надежности электроснабжения энергосистем
- ✓ Оптимизация распределения мощности электростанций между энергосистемами



ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ



Структурная схема биполярной ЛЭП постоянного тока на преобразователях напряжения

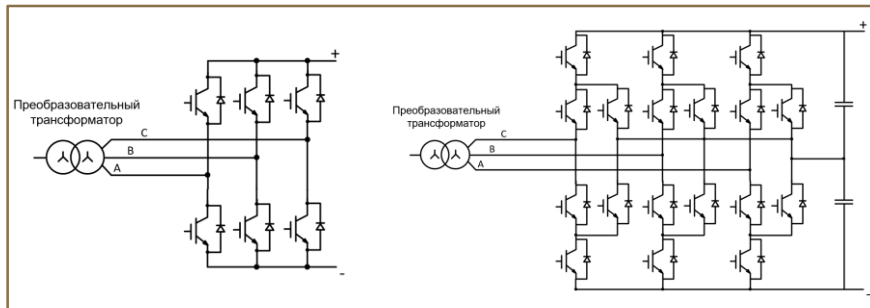


Схема двухуровневого преобразователя напряжения

Схема трехуровневого преобразователя напряжения

Название проекта, страна	Номинальное напряжение, кВ	Пропускная способность, МВт	Длина ЛЭП, км
Zhangbei, Китай	± 500	3 000	500 (ВЛ)
UltraNet, Германия	± 380	2 000	340 (ВЛ)
NordLink, Германия - Норвегия	± 525	1 400	623 (КВЛ)
Нето, Англия - Бельгия	± 400	1 000	140 (КЛ)
Maritime Link, Канада	± 200	900	360 (КВЛ)

Q Преобразователь может **потреблять и генерировать** реактивную мощность

Задачи применения:

- ✓ Электроснабжение «слабых» или автономных энергосистем
- ✓ Повышение живучести энергосистемы за счет предотвращения каскадного развития аварий
- ✓ Построение сетей постоянного тока



ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

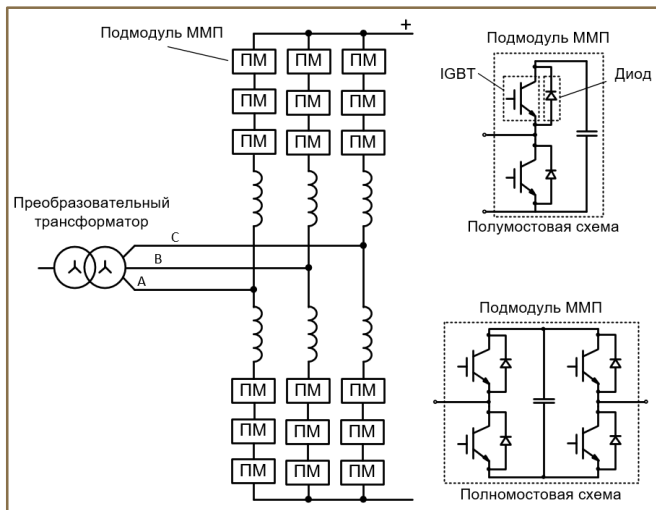


Схема преобразователя напряжения на модульных многоуровневых преобразователях

Преимущества ММП:

- ✓ Модульная структура
- ✓ Низкие потери мощности относительно других преобразователей напряжения
- ✓ Низкий уровень гармонических искажений на стороне переменного тока

Недостатки ММП:

- ✓ Увеличение стоимости за счет увеличения числа подмодулей (ПМ)
- ✓ Снижение надежности за счет увеличения числа подмодулей (ПМ)
- ✓ Большие потери мощности, чем в преобразователях тока
- ✓ Меньшая перегрузочная способность полупроводниковых элементов, чем в преобразователях тока



Развитие технологии преобразователей напряжения на ММП позволит обеспечить возможность строительства электропередач постоянного тока большой мощности



ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

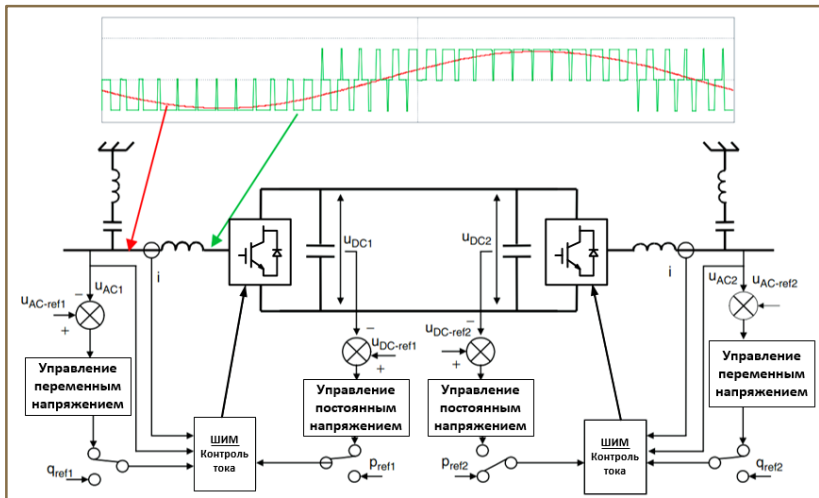


Схема управления преобразователя напряжения на модульных многоуровневых преобразователях

Метод управления – управление силовыми транзисторами (IGBT) сигналами широтно-импульсной модуляции

- ✓ Управление **переменным напряжением, постоянным напряжением и реактивной мощностью** на каждой преобразовательной ПС
 - ✓ Один преобразователь управляет постоянным напряжением ЛЭП, а другой – активной мощностью ЛЭП
 - ✓ Оба преобразователя регулируют переменное напряжение или реактивную мощность в примыкающей сети переменного тока
- Быстрое изменение режима работы ЛЭП ПТ: **I, P**
- Быстрое изменение режима работы примыкающей сети переменного тока: **U, Q**



Представленная система управления позволяет обеспечить независимое регулирование активной и реактивной мощности в точке подключения преобразователей напряжения к сети переменного тока



ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

	ЛЭП постоянного тока на преобразователях тока	ЛЭП постоянного тока на преобразователях напряжения
Номинальное напряжение	до ± 1100 кВ	до ± 500 кВ
Номинальная мощность в биполярной конфигурации	до 12 ГВт	до 3 ГВт
Длина ЛЭП	до 3284 км	до 500 км
Возможности регулирования активной мощности	Непрерывное регулирование с ограничением минимальной мощности	Непрерывное быстродействующее регулирование без ограничений минимальной мощности
Независимое управление активной и реактивной мощностью	Нет	Да
Потребление реактивной мощности	50-60% от передаваемой мощности	Потребление и генерация реактивной мощности в заданном диапазоне P-Q диаграммы
Регулирование напряжения на стороне переменного тока	Медленное, изменением положения отпаек РПН преобразовательного трансформатора	Быстрое регулирование (<100 мс)
Реверс мощности	Осуществляется изменением полярности напряжения	Осуществляется изменением направления тока
Требования к примыкающей сети переменного тока	Необходимо наличие активной нагрузки	Возможность работы с пассивной нагрузкой



ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ

10



«Развязывающий» элемент в кольцевых схемах – оптимизация режима для предотвращения перегрузок отдельных элементов кольца



Межсистемная связь заданной мощности – исключение нерегулярных колебаний по данной связи и снижение уровня таких колебаний на внутренних связях энергосистем



Возможность реализации управляющих воздействий противоаварийного управления



Возможность форсирования второго полюса при отключении первого в биполярных конфигурациях



СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР
ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
RUSSIAN POWER SYSTEM OPERATOR

ОДУ СИБИРИ

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Андерс Михаил Алексеевич

Филиал АО «СО ЕЭС» ОДУ Сибири,
Новосибирский государственный технический университет